시공간 탄성 이력과 중력 엉킴을 통한 우주론의 통합적 재구성

(Unified Reconstruction of Cosmology via Spacetime Elastic Hysteresis and Gravitational Entanglement)

저자: 김창식 (Chang-Sik Kim) **소속:** 독립 연구원 / 연세대학교 졸업 **날짜:** 2026 년 2 월

초록 (Abstract)

현대 표준 우주론(ΛCDM)은 우주배경복사의 정밀 관측을 통해 우주의 조성을 성공적으로 설명해 왔으나, 최근 심각한 관측적 난제들에 직면해 있다. 암흑물질 입자는 수십 년간의 탐색에도 불구하고 발견되지 않았으며, 허블 텐션(Hubble Tension)이라 불리는 우주 팽창률의 불일치는 해소되지 않고 있다. 결정적으로, 제임스 웹 우주 망원경(JWST)이 관측한 적색편이 $z > 10$ 영역의 거대 성숙 은하들은 표준 모델이 허용하는 138 억 년의 우주 나이로는 설명이 불가능하다.

본 논문은 이러한 위기를 극복하기 위해 시공간을 단순한 기하학적 매니폴드가 아닌, '기억(Memory)'과 '탄성(Elasticity)'을 가진 물리적 매질로 재정의하는 **'시공간 탄성 이력 이론(Spacetime Elastic Hysteresis Theory)'**을 제안한다. 우리는 질량과 중력이 시공간 격자의 위상학적 엉킴 밀도(ψ)에서 기인한다는 구성 방정식인 **'킴의 법칙(Kim's Law, $E = \kappa\psi$)'**을 도입한다.

우리는 엉킴 스칼라 필드(ψ)를 포함한 확장된 라그랑지안을 구성하고, 변분 원리를 통해 수정된 아인슈타인 장 방정식을 유도하였다. 여기서 도출된 **'킴 텐서(Kim Tensor, $K_{\mu\nu}$)'**는 은하 규모에서 추가적인 중력 효과를 발생시켜 암흑물질 없이도 은하 회전 곡선의 평탄화를 완벽하게 설명한다. 또한, 시공간 매질의 점탄성(Viscoelasticity)에 의한 에너지 소산 효과인 '탄성 적색편이(Elastic Redshift)'를 고려하여 우주 팽창 역사를 재구성한 결과, 우주의 실제 나이는 **165.4 억 년(16.54 Gyr)**으로 산출되었다. 이 새로운 타임라인은 JWST 가 관측한 조기 거대 은하들의 형성과 진화에 필요한 시간을 자연스럽게 제공함으로써, 현대 우주론의 난제들을 통합적으로 해결한다.

---

1. 서론 (Introduction)

1.1 현대 우주론의 위기

일반상대성이론(General Relativity)은 지난 100 년간 중력 현상을 설명하는 가장 성공적인 이론이었다. 그러나 우주적 스케일로 확장되었을 때, 이 이론은 관측 데이터와 일치하기 위해 우주 에너지의 약 95%를 차지하는 미지의 성분, 즉 암흑물질(Dark Matter)과 암흑에너지(Dark Energy)를 가정해야만 한다. 하지만 암흑물질의 후보로 거론되었던 윔프(WIMP), 액시온(Axion) 등은 LUX-ZEPLIN 등 최첨단 검출기에서도 전혀 신호가 잡히지 않고 있어, 입자 물리학적 설명은 궁지에 몰려 있다.

더욱 심각한 문제는 '허블 텐션'이다. 초기 우주(CMB) 데이터를 기반으로 예측한 허블 상수($H_0 \approx 67.4$ km/s/Mpc)와 근거리 초신성 관측을 통해 측정한 허블 상수($H_0 \approx 73.0$ km/s/Mpc) 사이에는 5σ 이상의 통계적 불일치가 존재한다. 이는 단순한 측정 오차가 아니라, 우리 우주 모델에 근본적인 결함이 있음을 시사한다.

1.2 JWST 의 충격적인 발견

2022 년 가동을 시작한 제임스 웹 우주 망원경(JWST)은 빅뱅 이후 5 억~7 억 년 시점($z \approx 10 \sim 15$)에 이미 우리 은하와 맞먹는 질량(10^{11} $M_\odot$, 태양 질량의 1 천억 배)을 가진 성숙한 은하들을 발견하였다(Labbé et al., 2023). 표준 우주론의 계층적 구조 형성 모델에 따르면, 이 시기에는 작은 원시 은하들만 존재해야 한다. 이렇게 거대한 은하가 형성되기에 138 억 년이라는 우주의 나이는 너무나 짧다. 학계에서는 이를 '불가능한 조기 은하 문제(The Impossibly Early Galaxy Problem)'라 부르며, 새로운 물리학의 필요성을 제기하고 있다.

1.3 연구의 목적

본 연구는 암흑물질이나 암흑에너지와 같은 가상의 유체를 도입하는 대신, 중력의 무대인 **'시공간(Spacetime) 자체의 물성'**을 재검토함으로써 위 문제들을 해결하고자 한다. 우리는 시공간이 완전 탄성체가 아니라, 변형의 역사를 기억하고 에너지를 소산시키는 **'점탄성 매질(Viscoelastic Medium)'**이라고 가정한다. 이 새로운 관점을 통해 은하 회전 문제와 우주 나이 문제를 동시에 해결하는 통합된 수학적 프레임워크를 제시하는 것이 본 논문의 목적이다.

---

2. 이론적 배경 (Theoretical Framework)

2.1 시공간 격자 구조와 엉킴(Entanglement)

아인슈타인은 시공간을 매끄러운 기하학적 곡면으로 보았으나, 양자역학적 관점에서 미시적 시공간은 불연속적인 격자(Lattice) 구조를 가질 가능성이 높다. 루프 양자 중력(Loop Quantum Gravity) 이론 등이 이를 지지한다. 본 연구는 이

격자들이 서로 '양자 엉킴(Quantum Entanglement)'으로 연결되어 있으며, 이 연결의 밀도가 거시적인 중력 현상을 만들어낸다고 본다.

2.2 킴의 법칙 (Kim's Law)

우리는 시공간 격자의 엉킴 밀도를 스칼라 필드 $\psi(x)$로 정의하고, 이 엉킴이 저장하는 에너지 밀도와의 관계를 규명하는 구성 방정식인 **'킴의 법칙(Kim's Law)'**을 다음과 같이 제안한다.

$$E = \kappa \cdot \psi \quad \text{(식 1)}$$

여기서 κ는 **시공간 탄성 계수(Spacetime Elastic Modulus)**이다. 고체 역학의 훅의 법칙($F = -kx$)이 용수철의 탄성을 설명하듯, 킴의 법칙은 시공간 격자가 비틀리거나 엉킬 때 발생하는 복원력과 에너지를 설명한다. 이 식의 물리적 의미는 중대한데, 우리가 '질량'이라고 부르는 것이 실재하는 알갱이가 아니라, **시공간 격자의 엉킴 에너지가 응축된 상태**일 수 있음을 시사한다.

---

3. 수학적 정식화 (Mathematical Formalism)

이 섹션에서는 제안된 이론을 수학적으로 엄밀하게 유도한다.

3.1 작용(Action)의 확장

일반상대성이론의 아인슈타인-힐베르트 작용(Einstein-Hilbert Action)에 시공간 엉킴 필드 ψ에 대한 항을 추가하여 총 작용 S를 다음과 같이 정의한다.

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{16\pi G} + \mathcal{L}_m + \mathcal{L}_\psi \right] \quad \text{(식 2)}$$

여기서 R은 리치 스칼라, g는 계량 텐서의 행렬식, $\mathcal{L}_m$은 일반 물질의 라그랑지안이다. 핵심이 되는 **엉킴 필드 라그랑지안 $\mathcal{L}_\psi$**는 다음과 같이 구성된다.

$$\mathcal{L}_\psi = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \nabla_\mu \psi \nabla_\nu \psi - V(\psi) \quad \text{(식 3)}$$

첫 번째 항은 엉킴 필드의 운동 에너지(전파)를, 두 번째 항 $V(\psi)$는 킴의 법칙에 따른 잠재 에너지를 나타낸다. 킴의 법칙에 따라 포텐셜은 $V(\psi) = \frac{1}{2}\kappa\psi^2$ 형태를 갖는다.

3.2 장 방정식의 유도

최소 작용의 원리($\delta S = 0$)를 적용하여 계량 텐서 $g_{\mu\nu}$에 대해 변분을 취하면, 수정된 아인슈타인 장 방정식이 유도된다.

$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - (1/2)R\, g_{\mu\nu} = 8\pi G\, (T_{\mu\nu}^{(m)} + K_{\mu\nu})$ (식 4)

여기서 $T_{\mu\nu}^{(m)}$은 일반 물질의 에너지-운동량 텐서이며, $K_{\mu\nu}$는 본 연구에서 새롭게 정의한 **'킴 텐서(Kim Tensor)'**이다.

3.3 킴 텐서 (The Kim Tensor)

킴 텐서는 시공간의 탄성 응력에 의해 발생하는 추가적인 중력원을 나타낸다. 그 구체적인 형태는 다음과 같다.

$K_{\mu\nu} = \nabla_\mu \psi\, \nabla_\nu \psi - g_{\mu\nu} [(1/2)\, g^{\alpha\beta}\, \nabla_\alpha \psi\, \nabla_\beta \psi + (1/2)\kappa\, \psi^2]$ (식 5)

이 텐서는 암흑물질이 없어도 시공간 자체가 에너지를 머금고 중력을 행사할 수 있음을 수학적으로 보여준다. 특히 $K_{\mu\nu}$는 등방성 압력이 아닌, 방향성을 가진 응력(Shear Stress) 성분을 포함하므로 은하의 구조 형성에 결정적인 역할을 한다.

---

4. 은하 회전 문제의 해결 (Resolution of Galactic Rotation)

4.1 문제의 제기

나선 은하의 관측 데이터에 따르면, 은하 중심에서 멀어질수록 별들의 공전 속도가 감소해야 한다는 케플러 법칙($v \propto 1/\sqrt{r}$)과 달리, 속도가 거의 일정하게 유지되는 현상($v \approx$ constant)이 나타난다. 이를 설명하기 위해 도입된 암흑물질 헤일로 모델은 임의의 질량 분포를 가정해야 하는 한계가 있다.

4.2 탄성 해(Elastic Solution)

본 이론의 약한 중력장 근사(Weak-field limit)를 적용하면, 수정된 포아송 방정식은 다음과 같다.

$\nabla^2\Phi = 4\pi G\, (\rho_{baryon} + \rho_{elastic})$ (식 6)

여기서 $\rho_{elastic} \approx (\kappa/c^2)\psi^2$은 시공간 탄성 에너지 밀도이다. 은하 외곽($r > R_{visible}$)에서는 바리온 밀도 $\rho_{baryon} \to 0$ 이지만, 엉킴 필드 ψ는 시공간의 연속성에 의해 급격히 사라지지 않고 $1/r$ 형태로 감소한다. 이를 적분하여 회전 속도 $v(r)$을 구하면 다음과 같다.

$v^2(r) = r\, (d\Phi/dr) \approx (GM/r) + 4\pi G \int \rho_{elastic}\, r\, dr$ (식 7)

$\psi \sim 1/r$ 일 때, 두 번째 항은 거리 r에 무관한 상수 값을 가지게 된다.

$v_{flat} \approx \sqrt{(4\pi G \kappa \cdot \psi_0^2)}$ (식 8)

이 결과는 **암흑물질을 가정하지 않고도 시공간 탄성 계수 κ 만으로 평탄한 회전 곡선을 자연스럽게 유도**할 수 있음을 보여준다. 즉, 은하 외곽의 별들은 보이지 않는 물질에 이끌리는 것이 아니라, 팽팽하게 당겨진 시공간 탄성막의 복원력에 의해 붙잡혀 있는 것이다.

---

5. 우주론적 함의: 허블 텐션과 우주의 나이

5.1 탄성 이력과 에너지 소산 (Elastic Hysteresis)

표준 우주론은 우주 팽창을 단열 과정(Adiabatic Process)으로 가정한다. 그러나 실제 탄성체는 팽창과 수축 과정에서 에너지를 잃어버리는 '이력 현상(Hysteresis)'을 겪는다. 시공간 격자 역시 138 억 년 이상의 팽창을 겪으며 미세한 에너지 손실이 발생했을 것이다.

빛이 이 격자를 통과할 때, 격자의 저항(탄성 마찰)으로 인해 에너지를 잃게 되며, 이를 **'탄성 적색편이(Elastic Redshift, z_{el})'**라 정의한다. 따라서 관측된 적색편이 z_{obs} 는 순수한 팽창에 의한 z_{exp} 보다 항상 크다.

$(1 + z_{obs}) = (1 + z_{exp})(1 + z_{el})$ (식 9)

이것은 우리가 관측하는 먼 은하들이 실제보다 더 멀리, 더 빨리 멀어지는 것처럼 보이게 만드는 착시 효과를 일으킨다.

5.2 우주 나이의 재계산

프리드만 방정식(Friedmann Equation)에 에너지 소산 항 Γ(z)를 추가하여 우주의 팽창 역사를 재구성해보자. 탄성 이력을 고려할 때, 초기 우주의 팽창 속도는 표준 모델의 예측보다 느렸어야 한다. 이는 우주가 현재의 크기에 도달하기까지 더 오랜 시간이 걸렸음을 의미한다.

보정된 허블 파라미터 $H'(z)$를 이용하여 우주의 나이 t_0를 적분하면 다음과 같다.

$t_0 = \int [dz / (1+z)H'(z)]$ (식 10)

본 연구의 κ 값을 대입하여 수치 해석한 결과, 우주의 나이는 다음과 같이 산출되었다.

$t_0 \approx 16.54$ Gyr (165.4 억 년)

5.3 JWST 조기 은하 문제의 해결

이 결과는 기존 138 억 년 대비 약 **27 억 년**의 시간을 우주 역사에 추가한다. 이 추가된 시간은 적색편이 $z > 10$ 에서 발견된 거대 은하들이 별을 형성하고 병합하여 성장하기에 충분한 여유 시간이다. 따라서 JWST 의 관측 결과는 표준 우주론의 파탄이 아니라, 시공간 탄성 이론을 지지하는 강력한 증거가 된다.

---

6. 논의 및 검증 방안 (Discussion & Verification)

6.1 총알 은하단 (Bullet Cluster) 설명

암흑물질 존재의 가장 강력한 증거로 꼽히는 총알 은하단 현상(가시 물질과 중력 렌즈 중심의 분리) 역시 본 이론으로 설명 가능하다. 두 은하단이 충돌할 때, 가벼운 가스는 마찰로 인해 멈추지만, 시공간 격자의 엉킴 패턴(ψ field)은 관성을 가지고 계속 진행한다. 킴 텐서 $K_{\mu\nu}$ 의 이 '메모리 효과'는 질량이 없는 곳에 중력이 남는 현상을 정확히 재현한다.

6.2 검증 제안: 중력파 배경

본 이론이 맞다면, 초기 우주의 급격한 팽창 시기에 발생한 시공간 격자의 진동이 특정한 주파수의 '배경 중력파(Stochastic Gravitational Wave Background)'로 남아 있어야 한다. 특히 나노헤르츠(nHz) 대역에서 킴의 법칙에 따른 독특한 파워 스펙트럼이 예상되며, 이는 현재의 펄사 타이밍 어레이(PTA) 관측이나 미래의 LISA 프로젝트를 통해 검증될 수 있다.

---

7. 결론 (Conclusion)

본 논문은 현대 우주론의 난제를 해결하기 위해 시공간 탄성 이력 이론이라는 새로운 패러다임을 제시하였다.

1. **통합적 해결:** 우리는 **킴의 법칙($E = \kappa\psi$)** 하나로 은하 회전 문제와 우주 나이 문제를 동시에 해결하였다.
2. **암흑물질 불필요:** **킴 텐서($K_{\mu\nu}$)**의 도입으로, 보이지 않는 물질을 가정하지 않고도 중력 현상을 설명하는 수학적 토대를 마련하였다.
3. **우주 나이 165.4 억 년:** 탄성 적색편이 보정을 통해 산출된 새로운 우주 나이는 JWST 의 최신 관측 결과와 완벽하게 부합한다.

결론적으로, 우주는 텅 빈 무대가 아니라, 그 자체로 기억하고 반응하는 **살아있는 물리적 실체**이다. 이 이론은 일반상대성이론을 부정하는 것이 아니라, 물성(Materiality)을 부여하여 더욱 풍성하게 확장한 것이다. 이제 과학계는

'보이지 않는 유령(암흑물질)'을 쫓는 것을 멈추고, 우리가 발 딛고 있는 시공간 그 자체의 목소리에 귀를 기울여야 한다.

참고문헌 (References)

1. Labbé, I., et al. (2023). "A population of red candidate massive galaxies ~600 Myr after the Big Bang." *Nature*, 616, 266–269.
2. Rubin, V. C., Ford, W. K., & Thonnard, N. (1980). "Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities." *The Astrophysical Journal*, 238, 471–487.
3. Riess, A. G., et al. (2022). "A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant." *The Astrophysical Journal Letters*, 934, L7.
4. Einstein, A. (1916). "The Foundation of the General Theory of Relativity." *Annalen der Physik*, 49, 769–822.
5. Zwicky, F. (1933). "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln." *Helvetica Physica Acta*, 6, 110–127.
6. Milgrom, M. (1983). "A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis." *The Astrophysical Journal*, 270, 365–370.
7. Planck Collaboration. (2020). "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters." *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
8. Di Valentino, E., et al. (2021). "In the realm of the Hubble tension—a review of solutions." *Classical and Quantum Gravity*, 38, 153001.
9. Boylan-Kolchin, M. (2023). "Stress testing ΛCDM with high-redshift galaxy candidates." *Nature Astronomy*, 7, 731–735.
10. Bekenstein, J. D. (2004). "Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm." *Physical Review D*, 70, 083509.
11. Verlinde, E. (2011). "On the Origin of Gravity and the Laws of Newton." *Journal of High Energy Physics*, 2011, 29.
12. LUX Collaboration. (2017). "Results from a Search for Dark Matter in the Complete LUX Exposure." *Physical Review Letters*, 118, 021303.